

# 川西南中二叠统栖霞组斑马构造白云岩形成机理 ——以宝兴五龙剖面为例

赵金<sup>1</sup>, 冯明友<sup>1</sup>, 沈安江<sup>2</sup>, 文龙<sup>3</sup>, 徐亮<sup>3</sup>, 王兴志<sup>1</sup>, 刘小洪<sup>1</sup>

1 西南石油大学地球科学与技术学院; 2 中国石油杭州地质研究院; 3 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院

**摘要** 以四川盆地西南部宝兴五龙地区中二叠统栖霞组斑马构造白云岩为研究对象,应用岩石学、地球化学等手段对其成因开展综合分析。研究区内斑马构造白云岩主要发育于栖霞组一段上部,斜交或平行层面分布。斑马构造暗带、亮带分别由具残余组构的粉—细晶白云石及中—巨晶鞍状白云石组成,阴极发光分别呈暗红、亮红色,指示晶体生长空间及流体交代过程的元素差异性。斑马构造亮带、暗带白云石有序度均较低, $\delta^{18}\text{O}$ 值负异常明显;暗带的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值处于或略高于同期海水范围,亮带明显较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值指示了深部流体的影响;亮带、暗带均具有低 $\Sigma\text{REE}$ 含量及明显的Eu正异常。综合研究表明,川西南栖霞组斑马构造白云岩属埋藏期热液交代—结晶作用成因,反映了热液流体持续供给下白云石结晶力与岩石抗张强度的动态平衡过程。斑马构造白云岩的形成历经3个阶段:①热液流体沿基底断裂垂向运移,富镁流体顺层进入高孔渗地层并持续溶解—交代石灰岩而形成暗带白云石;②在白云石结晶力大于岩石抗张强度情况下会产生破裂,从而形成一系列裂缝;③溶解作用结束后,裂缝流体中的离子沉淀而形成亮带鞍状白云石。

**关键词** 斑马构造;热液白云岩;交代—结晶作用;栖霞组;二叠系;川西南

**中图分类号**:TE122.2 **文献标识码**:A

## 0 前言

斑马构造为由一系列毫米至厘米级相互平行的亮带、暗带白云岩交替出现而形成的带状构造<sup>[1]</sup>。该构造一般发育在碳酸盐岩地层,并与热液白云岩储层密切相关;也可见于与菱铁矿、闪锌矿、重晶石、萤石、菱镁矿及其他矿物相伴生的地层中。其韵律性亮—暗条纹也被称为“斑马纹构造白云岩”、“斑马岩”或“韵律条带”<sup>[2-8]</sup>。斑马构造在国外集中分布于欧洲的寒武系、三叠系和北美的寒武系、泥盆系,多形成孔洞、裂缝发育的优质油气储层;在国内主要见于塔里木盆地、四川盆地等西部盆地的古生界<sup>[9-11]</sup>。众多学者对该特殊构造开展过广泛研究:在形成时间上,有同沉积成因、早期成岩成因或晚期成岩成因等不同的观点<sup>[7-8,12-16]</sup>;在成岩模式上,有水力压裂、交代—结晶、宿主碳酸盐岩溶解、扩散及沉淀、后期流体脉式充注等多种模式。此外,关

于斑马构造白云岩中流体溶蚀—充注期次、流体来源及改造过程的争议亦较大<sup>[14,17-20]</sup>。

四川盆地中二叠统栖霞组一茅口组发育大量白云岩,部分学者认为其成因与峨眉山火山活动的热液流体相关<sup>[21]</sup>。其中,川西南栖霞组白云岩中见大量斑马构造,前人对斑马构造岩石学特征的精细研究较少,其形成机理及此类白云岩的储集性能等特征尚不明确。鉴于此,本文针对川西南中二叠统栖霞组斑马构造白云岩开展系统的岩石—地球化学特征研究,揭示斑马构造形成过程及流体性质,剖析其成因机理,以期为该类型白云岩的油气勘探提供部分理论支撑。

## 1 区域地质概况

四川盆地西南部位位于峨眉—雅安—乐山—洪雅一带,受控于复杂的龙泉山和龙门山基底褶皱构造带。研究区雅安市宝兴县处于映秀—五龙断裂

收稿日期:2019-12-16; 改回日期:2020-04-02

本文受国家科技重大专项下课题“四川盆地二、三叠系构造—沉积演化及储层形成机制研究”(编号:2016ZX05007-004-001)及中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室创新基金项目“热液溶蚀及沉淀作用对深层碳酸盐岩储层复合改造机理”(编号:RIPED-HZDZY-2019-JS-695)共同资助

**第一作者**:赵金,西南石油大学矿物学、岩石学、矿床学在读硕士研究生,从事储层地质研究。通信地址:610500 四川成都市新都区新都大道8号西南石油大学地球科学与技术学院;E-mail:767118114@qq.com

与小关子断裂之间(图1a),受茂汶—陇东韧性剪切构造带及宝兴杂岩推覆构造带影响,主断层总体呈北东—南西向、北西—南东向,局部发育近南北向的次级断裂。研究区内除寒武系和奥陶系缺失外,基底至三叠系发育较完整(图1a),其中,新元古界花岗岩、闪长岩基底及二叠系玄武岩大范围出露。在晚石炭世加里东运动后,沉积了下二叠统梁山组粉砂岩、砾岩及中二叠统栖霞组、茅口组碳酸盐岩,后受东吴运动—印支运动及燕山运动—喜马拉雅运动等多期构造运动改造。其中的海西早期东吴运动导致宝兴地区上地壳隆起、张裂,从而产生大量断层及裂缝,同时喷出大量岩浆并形成规模庞大的峨眉山大火成岩省。研究区位于峨眉山大火成岩省的中带,中—晚二叠世的峨眉地裂运动导致玄

武岩多沿北西向基底断裂大规模发育<sup>[11]</sup>。

栖霞组与上覆、下伏地层呈整合接触。栖霞组为完整的海进—海退旋回控制下的浅水碳酸盐沉积,由下至上可划分为2个段(图1b),栖霞组一段(简称栖一段)与栖二段呈整合接触。川西南中二叠世以浅水碳酸盐台地环境为主,水体循环良好,盐度正常至略偏高,生物种类丰富<sup>[22]</sup>。研究区内栖霞组主要由浅灰色—深灰色薄—中层泥晶生物碎屑灰岩、厚层—块状亮晶生物碎屑灰岩及晶粒白云岩组成,夹深灰色薄层生物碎屑钙质泥岩,由下向上泥质含量逐渐减少,局部地区见眼球状构造,偶见燧石条带及燧石结核;生物化石含量丰富,以蠕类、腕足、棘皮等为主。白云岩主要发育于栖一段中上部及栖二段顶部(图1b)。

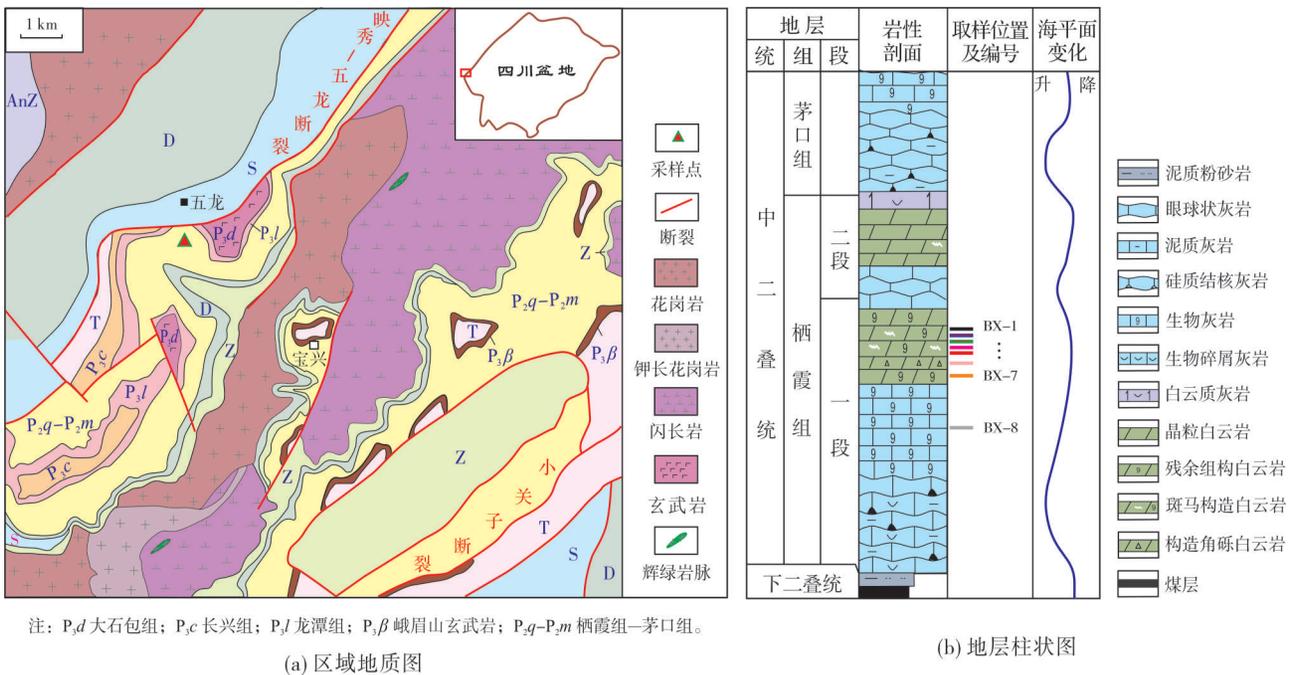


图1 川西南宝兴地区地质简图及栖霞组地层综合柱状图

Fig. 1 Geological map and stratigraphic column of Qixia Formation in Baoxing area, southwest of Sichuan Basin

## 2 采样及分析方法

本次研究的野外剖面位于四川省雅安市宝兴县五龙乡(图1a)。首先对栖霞组露头进行系统观测,并从下至上依次对重点层段取样25件,取样后按分析项目类型分别进行岩石铸体薄片、阴极发光薄片磨制并完成相关分析测试工作。所有薄片均采用茜素红溶液染色,铸体薄片以蓝色环氧化树脂充注。

薄片鉴定及阴极发光分析在西南石油大学地球科学与技术学院完成,仪器分别为Olympus BX53显微镜及CL8200 MK5阴极发光显微镜。电子探针分析由西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成,分析仪器为日本电子JXA-8230。主量和微量元素、稀土元素、有序度及铈同位素分析测试由广州澳实分析测试实验室完成,采用硼酸锂熔融、等离子质谱进行定量分析。碳、氧同位素测试采用微钻

取样后在西南石油大学完成:样品制备采用磷酸盐法,分别在25℃和75℃的恒温下提取收集碳酸盐岩中的CO<sub>2</sub>并送质谱分析;同位素检测采用德国Elementar公司的IsoPrime GC5同位素质谱仪完成,同位素值采用‰表示(PDB标准),误差小于±0.1‰。全岩稀土元素分析数据按北美页岩(NASC)进行标准化,元素异常值采用公式 $\delta Ce = Ce_N / (2Pr_N - Nd_N)$ 、 $\delta Eu = Eu_N / (0.5Sm_N + 0.5Gd_N)$ 计算得出<sup>[23]</sup>。

### 3 岩石学特征

研究区栖霞组发育的白云岩主要有晶粒白云岩、斑马构造白云岩及构造角砾白云岩。野外观察表明:斑马构造集中发育在栖霞一段中上部晶粒白云岩地层(图2a, 2b),斑马构造白云岩由深色的暗带

白云石与浅色的亮带白云石组成,形成亮带、暗带规则交替出现的韵律旋回。斑马构造在靠近层系界面附近发育数量较多,远离层系界面逐渐减少;而且,随着与层面距离的增加,斑马构造产状由斜交层面(夹角30°~40°)渐变为近顺层分布(图2c, 2d)。五龙剖面斑马构造累计百余组,横向上延伸4~10 m,单层垂向延伸约0.7 m,累计厚度6~8 m;其中,暗带条纹宽约0.3~2 cm,亮带条纹宽约0.1~1 cm。此外,构造角砾白云岩及角砾基质中含小型斑马构造,角砾间发育裂缝及溶蚀孔洞(图2e, 2f),部分裂缝或孔洞被最晚期的亮晶方解石半充填—近全充填(图2g)。部分斑马构造中见毫米至厘米级的近垂直白云石脉体,延伸几厘米后趋于消失;偶见斑马构造被沥青侵染的缝合线切穿(图2h)。

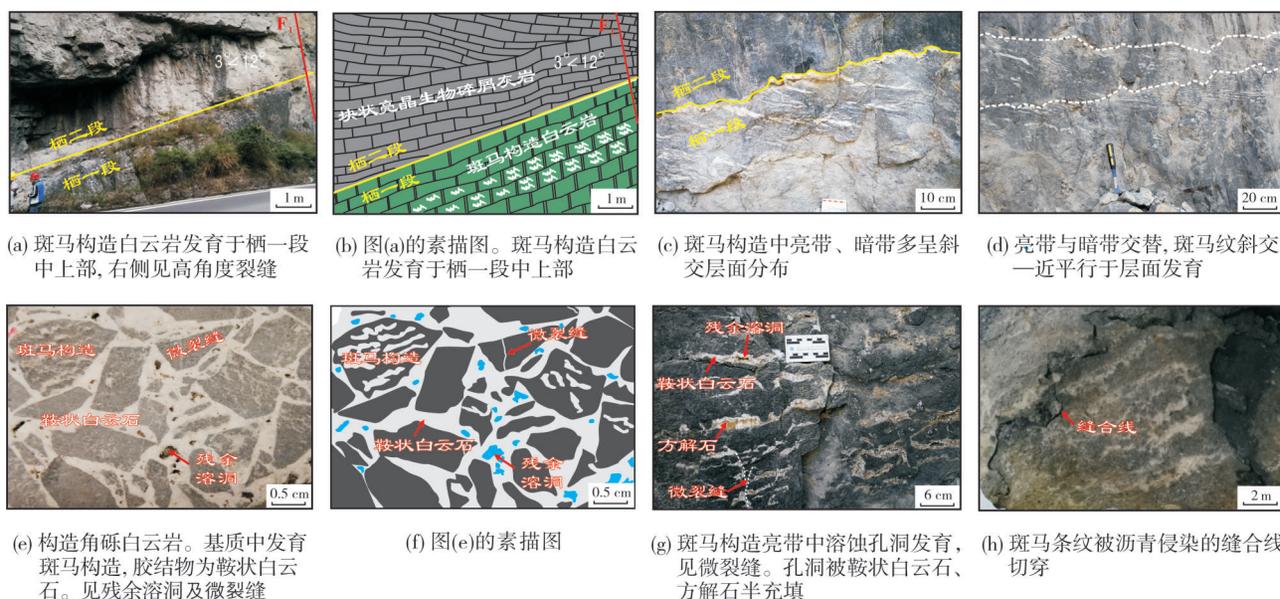


图2 川西南宝兴五龙剖面栖霞组斑马构造白云岩宏观特征

Fig. 2 Macro characteristics of zebra dolomite of Qixia Formation of Wulong outcrop in Baoxing area, southwest of Sichuan Basin

显微观察表明:斑马构造中暗带一般由深色半自形—他形粉—细晶白云石组成,晶粒较小呈曲面接触、见雾心亮边,多保留原岩部分沉积组构并逐渐向基质粉晶白云岩过渡(图3a—3c),阴极发光下暗带发暗红色光(图3d);亮带由浅色他形中—巨晶白云石组成,晶体多为曲面接触,正交偏光下具波状消光,属典型鞍状白云石(晶面较洁净,见少量云雾状粗晶鞍状白云石,可能因包裹体或杂质含量不同所致<sup>[10]</sup>;偶见“压力影”构造;亮带中心残余溶孔/洞发育),阴极发光下亮带发亮红色光并多见环带

结构。另外,见少量亮带中晶粒相对较小的斑马构造(图3e—3h)。研究区栖霞组斑马构造发育2期白云石(亮带白云石、暗带白云石),与国外部分地区斑马构造发育的多期白云石(暗带白云石、亮带早期白云石及晚期白云石)略有差异<sup>[15]</sup>。

此外,构造角砾岩中角砾基质与暗带成分一致,胶结物与亮带相似。基质与胶结物接触处可见明显的水力压裂通道,而且在胶结物的中心发育残余溶孔(图3i, 3j)。角砾基质、胶结物的阴极发光特征分别与暗带、亮带相同(图3g—3l)。

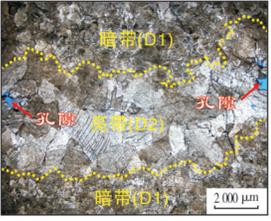
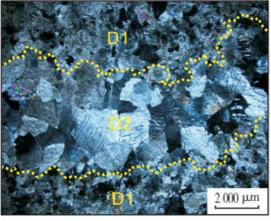
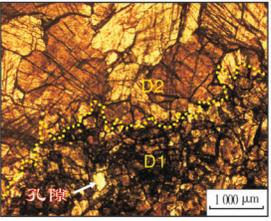
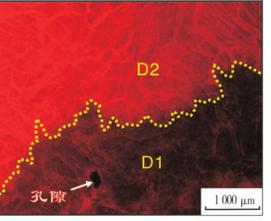
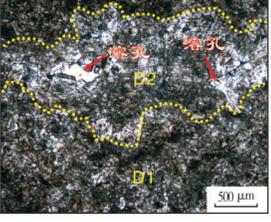
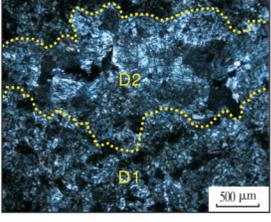
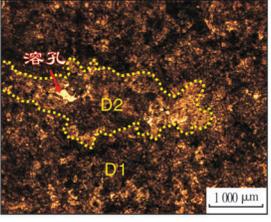
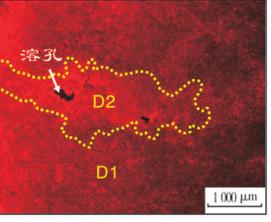
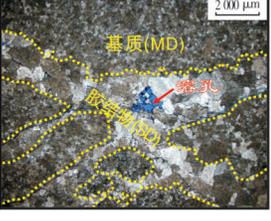
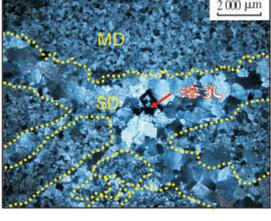
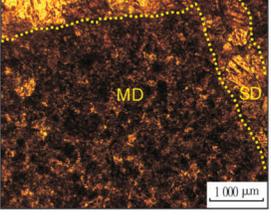
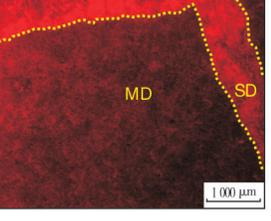
样品编号	普通薄片		阴极发光片	
	单偏光	正交光	单偏光	阴极发光
BX-1 (斑马构造白云岩)	 (a) 暗带为粉—细晶白云石, 亮带为中粗晶鞍状白云石	 (b) 亮带鞍状白云石波状消光明显	 (c) 亮带和暗带的白云石及孔隙	 (d) 暗带发暗红色光, 亮带发亮红色光, 具环带结构
BX-2 (斑马构造白云岩)	 (e) 特征与图(a)近似, 但晶粒较小, 残余溶孔发育。	 (f) 亮带鞍状白云石具波状消光	 (g) 亮带和暗带的白云石。见残余溶孔	 (h) 暗带发暗红色光, 亮带发亮红色光, 具环带结构
BX-6 (构造角砾白云岩)	 (i) 基质为具残余结构的粉—细晶白云石, 胶结物为鞍状白云石。见残余溶孔和半充填裂缝	 (j) 胶结物鞍状白云石具波状消光	 (k) 基质和胶结物	 (l) 基质发暗红色光, 胶结物发亮红色光

图3 川西南宝兴五龙剖面栖霞组斑马构造白云岩微观特征

Fig. 3 Micro characteristics of zebra dolomite of Qixia Formation of Wulong outcrop in Baoxing area, southwest of Sichuan Basin

## 4 地球化学特征

样品地球化学分析数据见表1。

### 4.1 同位素特征

对于碳酸盐岩成岩流体来源的辨识, 通过应用碳氧稳定同位素方法可有效降低不确定性。一般来讲, 温度、压力的增加多会导致 $^{18}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}$ 的亏损<sup>[24]</sup>。从表1、图4a可以看出, 川西南栖霞组斑马构造白云岩暗带的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $2.10\text{‰}$ ~ $3.31\text{‰}$ (平均为 $2.53\text{‰}$ ), 亮带的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $1.72\text{‰}$ ~ $2.82\text{‰}$ (平均为 $2.25\text{‰}$ ), 亮带、暗带白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异较小, 而且与生物碎屑灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相似(研究区内栖霞组生物碎屑灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $3.48\text{‰}$ )。斑马构造白云岩暗带的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-11.30\text{‰}$ ~ $-6.95\text{‰}$ (平均为 $-9.14\text{‰}$ ), 亮带的

$\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-13.18\text{‰}$ ~ $-7.14\text{‰}$ (平均为 $-9.69\text{‰}$ ), 亮带、暗带的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相似, 且明显低于研究区内生物碎屑灰岩和同期海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(分别为 $-4.49\text{‰}$ 、 $-4.3\text{‰}$ ~ $0.1\text{‰}$ )<sup>[25]</sup>, 这指示斑马构造白云岩亮带、暗带均受到热分馏作用的影响<sup>[26]</sup>。

碳酸盐矿物具有壳源锶、幔源锶和海源锶等3种锶来源: 壳源锶因富 $^{87}\text{Rb}$ 衰变形成的 $^{87}\text{Sr}$ , 从而表现出高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(全球平均值为0.711 9); 幔源锶为大洋中脊热液系统向海水提供的相对贫放射成因的 $^{87}\text{Sr}$ 的锶, 故 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低(全球平均值为0.703 5)<sup>[27-28]</sup>; 海源锶则与近同期海水和海相沉积物相似, 二叠纪 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的变化范围为0.706 6~0.708 2<sup>[29]</sup>。研究区内栖霞组斑马构造白云岩暗带的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.707 7~0.708 3(图4b), 位于或略高于同期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化范围, 这表明暗带白

表1 川西南宝兴五龙剖面栖霞组碳酸盐岩稀土元素、同位素及有序度数据

Table 1 Data of REE, isotope and ordering degree of the carbonate rocks of Qixia Formation of Wulong outcrop in Baoxing area, southwest of Sichuan Basin

样品号	岩性	稀土元素( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )														元素异常值				同位素/ $\%$		$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	有序度	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma\text{REE}$	LREE	HREE	$\delta\text{Ce}$	$\delta\text{Eu}$	$\delta^{13}\text{C}$			$\delta^{18}\text{O}$
BX-1a	粉细晶白云岩	0.42	0.80	0.10	0.35	0.09	0.03	0.09	0.02	0.07	0.02	0.08	0.02	0.11	0.01	2.22	1.79	0.42	0.76	1.38	2.90	-7.43	0.70832	
BX-1b	鞍状白云石	0.27	0.53	0.06	0.24	0.05	0.02	0.06	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	1.42	1.18	0.25	0.81	1.49	2.11	-13.18	0.70900	
BX-2a	粉细晶白云岩	0.70	1.30	0.17	0.70	0.14	0.04	0.14	0.03	0.17	0.04	0.12	0.02	0.13	0.02	3.68	3.01	0.67	0.82	1.25	2.34	-11.14	0.70774	0.56
BX-2b	鞍状白云石	0.50	1.00	0.15	0.50	0.11	0.05	0.14	0.03	0.14	0.03	0.07	0.01	0.07	0.01	2.76	2.26	0.50	0.60	1.74	1.72	-9.66	0.70971	0.55
BX-3a	粉细晶白云岩	0.30	0.50	0.06	0.20	0.05	0.03	0.06	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	1.37	1.14	0.23	0.75	2.38	3.31	-6.95	0.70778	0.50
BX-3b	鞍状白云石	0.50	0.70	0.10	0.30	0.09	0.03	0.09	0.02	0.09	0.02	0.07	0.01	0.05	0.01	2.08	1.72	0.36	0.59	1.46	2.28	-7.24	0.70981	0.52
BX-4a	粉细晶白云岩	0.64	1.26	0.16	0.67	0.13	0.03	0.13	0.02	0.14	0.03	0.10	0.02	0.11	0.02	3.47	2.89	0.58	0.85	1.11	2.10	-8.90	0.70790	
BX-4b	鞍状白云石	0.59	1.08	0.15	0.59	0.10	0.03	0.10	0.02	0.12	0.03	0.08	0.02	0.13	0.02	3.05	2.53	0.52	0.76	1.32	2.30	-10.00	0.70943	
BX-5a	粉细晶白云岩	0.32	0.64	0.08	0.26	0.06	0.02	0.07	0.01	0.06	0.01	0.06	0.01	0.05	0.01	1.67	1.39	0.28	0.72	1.31	2.00	-11.30	0.70770	0.54
BX-5b	鞍状白云石	0.42	0.70	0.10	0.30	0.07	0.03	0.08	0.02	0.06	0.02	0.06	0.01	0.07	0.01	1.94	1.61	0.33	0.61	1.57	2.82	-8.37	0.70945	0.53
BX-6a	粉细晶白云岩	0.48	0.95	0.12	0.47	0.10	0.03	0.10	0.02	0.10	0.02	0.08	0.01	0.08	0.01	2.57	2.14	0.43	0.80	1.18	3.59	-6.21	0.70796	
BX-6b	鞍状白云石	0.50	0.72	0.11	0.39	0.09	0.04	0.09	0.02	0.09	0.03	0.09	0.01	0.06	0.02	2.26	1.86	0.41	0.58	1.86	4.32	-7.33	0.70923	
BX-7	泥粉晶白云岩	0.51	1.07	0.14	0.56	0.14	0.03	0.11	0.02	0.09	0.02	0.04	0.01	0.04	0.01	2.76	2.43	0.33	0.79	0.90	4.79	-6.73	0.70835	
BX-8	生物碎屑灰岩	7.86	16.17	1.91	7.41	1.65	0.22	1.18	0.15	0.72	0.12	0.30	0.04	0.27	0.04	38.04	35.22	2.82	0.86	0.69	3.48	-4.49	0.70757	

云岩成岩流体保留了大部分海水成分<sup>[21]</sup>;而亮带的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.7090~0.7098,明显高于同期海水及幔源锶的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化范围,这表明亮带的白云石化流体为携带部分壳源锶的外来流体,

高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值可能是流体与富锶岩层相互作用的结果。亮带、暗带的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值差异明显,推断是暗带(含较多原生组构)未被富含 $^{87}\text{Sr}$ 的流体完全交代所致<sup>[30]</sup>。

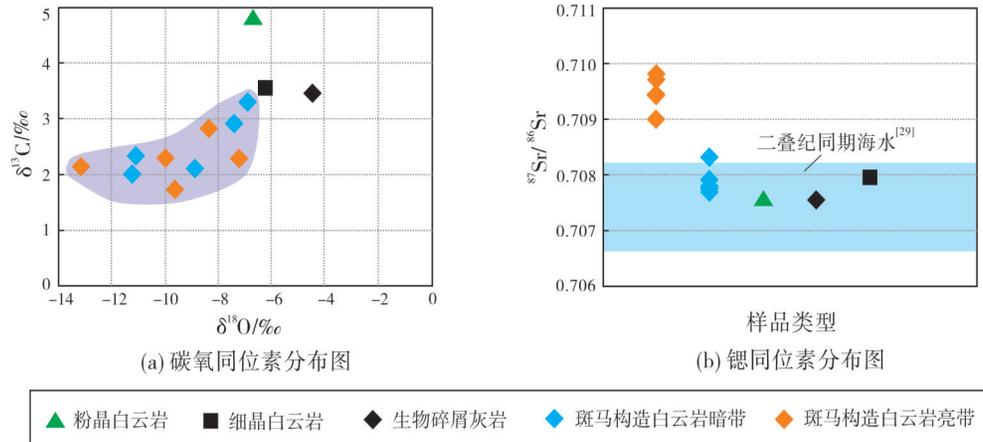


图4 川西南宝兴地区栖霞组碳酸盐岩稳定同位素分布图

Fig. 4 Crossplot of stable isotope of carbonate rocks of Qixia Formation in Baoxing area, southwest of Sichuan Basin

## 4.2 微量元素特征

研究区斑马构造亮带、暗带白云石中微量元素含量差异明显(图5)。电子探针分析结果表明:暗带白云石中Na、K、Sr、Ba含量的平均值分别为350.37  $\mu\text{g/g}$ 、76.91  $\mu\text{g/g}$ 、184.74  $\mu\text{g/g}$ 、99.30  $\mu\text{g/g}$ ,亮带白云石中Na、K、Sr、Ba含量平均值分别为252.06  $\mu\text{g/g}$ 、18.14  $\mu\text{g/g}$ 、140.17  $\mu\text{g/g}$ 、75.59  $\mu\text{g/g}$ ,暗带白云石中Na、K、Sr、Ba含量明显高于亮带。这可能是由于形成暗带的成岩流体混合了部分海水的缘故。总的来看,亮带、暗带中Na含量较高,指示成岩流体盐度较高。白云石化是一个Sr逐渐损失的过程<sup>[31]</sup>,因此早期形成的白云石较晚期形成的白云石Sr含量高。暗带白云石的Sr含量较亮带白云石更高,指示暗带白云石较亮带白云石更早形成,而亮带鞍状白云石可能受到重结晶作用影响<sup>[32]</sup>。Budd<sup>[33]</sup>认为只有当Fe含量大于1000  $\mu\text{g/g}$ 、Mn含量大于100  $\mu\text{g/g}$ 时,才指示白云岩形成于强还原条件下或者成岩过程中有外部来源的、富Fe-Mn流体的参与。然而研究区暗带白云石中Fe、Mn含量的平均值分别为186.88  $\mu\text{g/g}$ 、145.90  $\mu\text{g/g}$ ,亮带白云石中Fe、Mn含量的平均值分别为290.85  $\mu\text{g/g}$ 、226.06  $\mu\text{g/g}$ ,斑马构造的Fe、Mn含量并不高,这表明斑马构造白云岩可能形成于浅一中埋藏阶段。

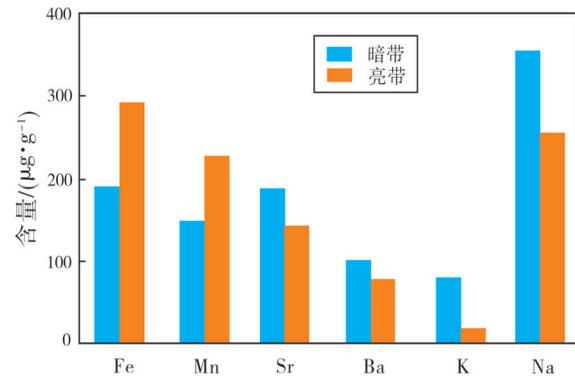


图5 川西南栖霞组斑马构造白云岩微量元素含量直方图

Fig. 5 Trace element content histogram of zebra dolomite of Qixia Formation in Baoxing area, southwest of Sichuan Basin

## 4.3 白云石有序度

白云石有序度的高低与结晶速度有关。埋藏早期形成的白云石有序度较低,随着埋藏深度的增加有序度会逐渐升高,但高温能克服白云石化过程中的动力学障碍,使白云石晶格畸变并快速结晶<sup>[34]</sup>。研究区栖霞组斑马构造白云岩亮带(鞍状白云石)有序度为0.52~0.55,暗带(晶粒白云岩)有序度为0.50~0.56(表1),亮带、暗带有序度均较低且差异较小,不具有深埋藏环境缓慢结晶形成的高有序度特征,因此推测是在高温热液流体的影响下快速结晶形成,具有埋藏早期快速结晶的特征。

#### 4.4 稀土元素特征

稀土元素特征可反映碳酸盐沉积环境和成岩流体来源<sup>[21]</sup>。研究区栖霞组石灰岩总稀土含量( $\Sigma\text{REE}$ )高(表1,样品BX-8),稀土元素配分模式总体表现为轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的“右倾型”曲线特征,无Eu正异常及Ce负异常(图6)。相比而言,如表1所示,斑马构造白云岩 $\Sigma\text{REE}$ 明显偏低(亮带、暗带的平均值分别为 $2.49\ \mu\text{g/g}$ 、 $2.26\ \mu\text{g/g}$ ),稀土元素配分模式总体表现为轻稀土元素相对亏损、重稀土元素相对富集的“左倾型”曲线特征,具有Eu正异常及轻微的Ce负异常(图6)。

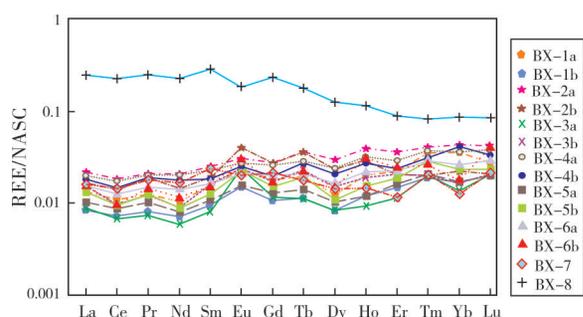


图6 川西南栖霞组斑马构造白云岩稀土元素配分模式图  
Fig. 6 REE distribution patterns of zebra dolomite of Qixia Formation in Baoxing area, southwest of Sichuan Basin

前人的研究表明:Ce对氧化还原条件极为敏感,可反映成岩环境的氧化程度<sup>[35-36]</sup>。易溶解的 $\text{Ce}^{3+}$ 在氧化条件下氧化为较难溶解且更稳定的 $\text{Ce}^{4+}$ 而富集,故Ce负异常多指示缺氧环境。研究区内斑马构造中亮带、暗带均具有轻微的Ce负异常,且亮带较暗带Ce负异常更明显,这指示亮带形成于比暗带更趋于封闭和还原的环境。Eu在自然界中主要以 $\text{Eu}^{2+}$ 和 $\text{Eu}^{3+}$ 两种价态赋存, $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 氧化还原电位主要受温度控制,当温度升高时 $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 的平衡向氧逸度增加的方向转移;尤其在大于 $250\ ^\circ\text{C}$ 的高温环境下,Eu多以 $\text{Eu}^{2+}$ 形式存在,因较 $\text{Eu}^{3+}$ 更易进入矿物晶格中而表现出Eu正异常<sup>[37]</sup>。研究区内斑马构造白云岩中暗带、亮带均显示Eu正异常,且亮带Eu正异常较暗带明显,这指示斑马构造亮带、暗带均受到热液流体影响,且亮带遭受的热液作用更为强烈。

## 5 讨论

斑马构造白云岩中亮带、暗带的形成过程,实际上是构造驱动下岩石-流体相互作用导致的矿物

溶蚀-交代-沉淀的动态平衡过程。岩石学及地球化学综合分析一致表明,川西南宝兴地区栖霞组斑马构造白云岩是由交代-结晶作用所致。

岩石学特征分析表明,斑马构造中暗带具残余生物/生物碎屑组构,为交代生物碎屑颗粒灰岩所致,这指示暗带属交代成因。暗带、亮带白云石分别具有暗红、亮红色的阴极发光特征,这是埋藏成岩流体交代过程中元素迁移及差异所致:暗带白云石多为早期成因,氧化条件下高价态Fe、Mn无法进入白云石晶格而使Fe、Mn含量较低,造成其阴极发光暗淡;而亮带白云石在浅埋藏的还原条件下形成,Fe、Mn以低价态更易进入白云石晶格而使Fe、Mn含量较高,Mn作为良好的激活剂导致其阴极发光为亮红色<sup>[38]</sup>。此外,亮带、暗带白云石晶体大小差异明显,反映亮带白云石形成及生长过程中具有更大的结晶空间。地球化学特征表明:斑马构造亮带、暗带中Na含量较高,指示斑马构造白云岩形成于盐度较高的流体环境;亮带、暗带的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显低于同期海水,但研究区内栖一段未见大气淡水淋滤等相关现象,指示亮带、暗带 $^{18}\text{O}$ 的亏损为温度效应所致;亮带、暗带的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别具明显高于幔源、略高于同期海水值的特征,亮带、暗带稀土元素均具轻微Ce负异常及Eu正异常(与海水的贫轻稀土元素、富重稀土元素明显不同),进一步指示斑马构造形成过程中受深部热液流体影响明显,白云石化流体为混入部分海水的深部热液卤水。

野外观察发现缝合线切穿斑马构造(图2h),这表明斑马构造白云岩形成时间早于缝合线。泥灰岩、颗粒质泥灰岩、灰泥质颗粒灰岩和弱胶结颗粒灰岩较易形成溶蚀缝合线<sup>[39]</sup>,大多在浅埋藏条件下即可形成<sup>[40]</sup>,因此可以推断斑马构造形成于早期浅埋藏环境。此外,研究区内可见斑马纹略显右行雁列式的脉体,可能指示其因下部地幔上隆引起区域拉张、局部层间剪切而形成,说明其形成于拉张构造作用环境。栖霞组沉积后,除东吴运动以拉张作用为主外,印支期一喜马拉雅期多以挤压作用为主。故从应力场角度推测,斑马构造形成时间应为东吴运动期(中二叠统沉积后埋藏期)。多数学者认为川西南中二叠统白云岩成因与峨眉山大火成岩省的活动有关<sup>[11,21,24]</sup>,以上证据表明斑马构造形成时间与热液流体作用时间吻合。Chung等<sup>[41]</sup>指出峨眉山玄武岩锶同位素比值为 $0.704\ 41\sim 0.706\ 38$ ,与

幔源锶接近。而研究区内斑马构造白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显高于幔源锶,这说明引起区内斑马构造白云岩锶同位素升高的原因与岩浆无关,而可能与岩浆期后的热液作用有关。瞿建威等<sup>[42]</sup>结合地球化学及年代学研究结果认为宝兴地区二叠系玄武岩(大石包组)是峨眉山地幔柱活动的产物,属于峨眉山大火成岩省的一部分;刘树文等<sup>[43]</sup>指出新元古界宝兴杂岩中的英云闪长质和花岗闪长质岩浆形成于下地壳玄武质岩石的部分熔融,而二长花岗质岩浆形成于杂砂岩的部分熔融,花岗质片麻岩岩浆形成于铁镁质源岩和杂砂岩的壳源岩区部分熔融。因此,研究区内栖霞组斑马构造白云石化流体可能为携带部分壳源锶的外来流体与中二叠统下伏梁山组碎屑岩(泥质粉砂岩及砾岩)及栖霞组海相流体相互混合的产物。

Maliva等<sup>[44]</sup>指出,结晶力是在溶液(过饱和到一定程度)中生长的晶体产生的用以平衡围岩岩石静压力的一种应力,而发生交代作用则是因为新形成的矿物晶体产生结晶力导致被交代矿物中出现压溶作用而引起的。Scherer通过在石灰岩的孔隙内结晶析出盐岩的实验进一步证实,盐岩结晶时产生的应力(3.8 MPa)可导致石灰岩破碎并形成裂缝<sup>[45]</sup>。该破碎现象与石灰岩内部交代矿物及晶体生长产生裂缝在机理上具有相似性。由此可见,由富镁流体交代原岩形成的暗带白云石晶粒在结晶时产生的结晶力是诱发斑马纹裂缝的关键。

交代-结晶作用中的开放空间是打破原有平衡应力体系并控制裂缝形成的关键因素。开放空间的形成需要有利的构造位置(邻近断层或裂缝)、高度过饱和流体的注入以及石灰岩地层的持续溶解。断层或裂缝是不同性质流体混合、运移的有利部位。深部热液流体通过断层向上部地层运移的同时,可能混合地层中其他性质的流体(暗带对应的成岩流体可能受到海水影响)。只有通过以断层作为流体运移通道的大规模、过饱和流体的持续注入才能使石灰岩层持续溶解,进而形成稳定、持续的开放空间体系。研究区内栖霞组发育斑马构造的构造角砾破碎明显,这表明斑马构造受到水力压裂作用的影响<sup>[46]</sup>。然而,无论岩石是否发生过交代作用,水力压裂成因的构造可形成于任何脆性岩石中。Fisher等<sup>[47]</sup>亦认为水力压裂无论在实验中还是理论上都不能产生类似斑马构造的裂缝系统,这暗

示研究区斑马构造只是受到(后期)水力压裂作用的影响,并非其形成的直接原因。

综上所述,东吴构造运动期间,随着峨眉山玄武岩岩浆大规模喷发,深部富 $\text{Mg}^{2+}$ 热液流体沿着大量沟通基底的张(扭)走滑断裂(映秀—五龙断裂)运移至栖霞组并交代石灰岩基质。基底热液流体经通道向上运移的过程中必然导致岩层破裂<sup>[48-49]</sup>,热液流体以爆炸方式强烈地顺层注入至高孔渗性地层中(图7b),并交代原岩而形成具残余组构的晶粒白云岩(暗带)(图7c)。在此过程中,由于受地层压力的影响,新生成的白云石晶粒在结晶过程中产生的结晶力与地层压力平衡,导致斑马纹不发育。但当热液流体沿层系界面和裂缝持续注入并不断溶解石灰岩时,则会形成新的开放空间;产生的流体压力减缓了围岩静压力的影响,从而打破原有的平衡体系。因此,当新生成的暗带白云石紧邻开放空间时,结晶力累积至超过岩石抗张强度后,会使新生成的岩石破裂产生裂缝(图7d,区域C1)。裂缝在形成、扩展与延伸过程中(通过邻区的溶解和交代)会释放周围的应力,而应力强度降低后则不足以形成新的裂缝;当与上一次形成的裂缝达到一定间距时,结晶力会重新积累并超过岩石的抗张强度,从而形成新的裂缝<sup>[17]</sup>。如此循环往复,即可形成斑马构造白云岩中近似等间距分布的裂缝(图7d,区域C2)。在平行裂缝形成之后,热液沿裂缝沉淀出鞍状白云石(亮带),它与暗带深色白云石/岩组成斑马构造(图7e)。当石灰岩溶解结束后,结晶力重新与地层压力平衡,此时斑马构造停止发育。此后,经历晚期成岩作用及构造作用复合改造,最终形成特殊的碳酸盐岩储层(图7f)。

因此,热液流体注入量、冷却速率与原岩的孔渗条件控制了斑马构造的发育程度。在整个交代-结晶过程中,基质中方解石溶解与白云石交代近乎同时发生,即暗带白云石与等间距裂缝同时形成,裂缝的间距取决于应力大小和岩石抗张强度<sup>[50]</sup>。对斑马构造压力与渗透率关系的分析表明:区内斑马构造白云岩渗透率为 $(100\sim 10\,000)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,压力约为100 MPa。此外,斑马构造中裂缝的间距也可能与流体成分和矿物的沉淀速率有关:高过饱和流体和快速沉淀多形成间距更小的裂缝系统<sup>[51]</sup>。尽管就热液白云岩储层而言,亮带鞍状白云石胶结物多起到降低孔隙的破坏性作用,然而国外亦有实

例表明,这种广泛发育的平行裂缝与溶蚀孔洞可形成连通的缝洞系统,因而多具有较高的孔隙度及渗透率,如苏伊士湾 Hammam Faraun 断块等发育斑马构造的白云岩为优质的天然气储层<sup>[52]</sup>。另外,研究区内斑马构造主要集中于栖霞一段中上部而在栖霞二段不发育,推测是由于断裂发育部位及栖霞一段与栖霞二段岩性存在较大差异所致:栖霞二段厚层一块状生物碎屑灰岩因早成岩期胶结作用而较致密,栖霞一段顶部受早期胶结作用影响弱且易于破碎,热液优先进入优势通道并交代围岩,故栖霞一段中上部更有利于形成斑马状白云岩。

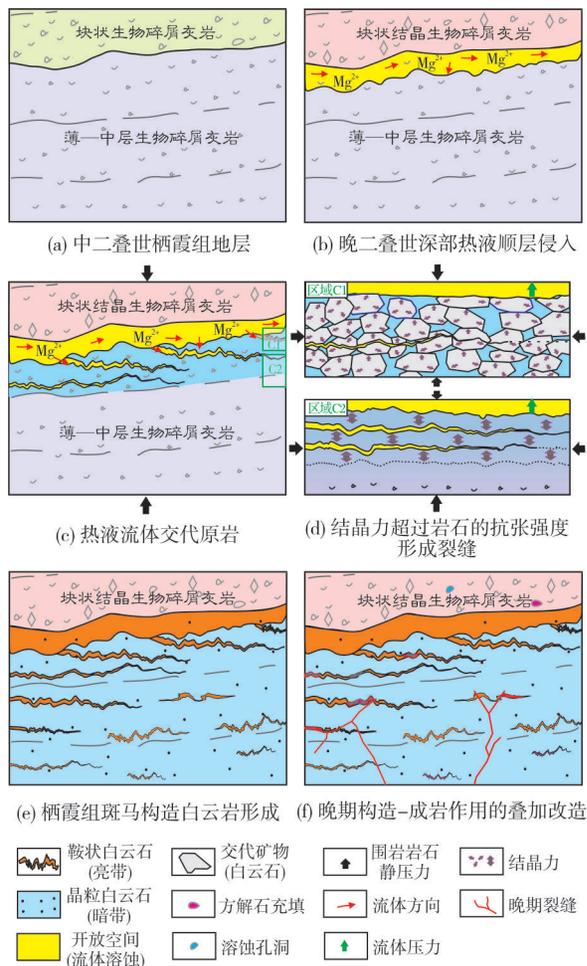


图7 川西南栖霞组斑马构造白云岩发育模式

Fig. 7 Genesis model of zebra dolomite of Qixia Formation, southwest of Sichuan Basin

## 6 结论

(1)川西南中二叠统栖霞组斑马构造白云岩由暗带、亮带2期白云石组成。岩石学特征表明斑马构造为交代-沉淀成因。亮带、暗带富含Na元素,

$\delta^{18}\text{O}$  值极偏负,稀土元素具有Eu正异常,白云石有序度较低,这些地球化学特征综合指示斑马构造为埋藏过程中构造热液作用所致。

(2)斑马构造白云岩的形成机理为:富镁热液沿断层重复-瞬时脉冲运移至高孔渗性地层,并在持续性溶蚀-交代石灰岩基质过程中形成暗带白云石,当白云石晶粒重结晶的结晶力超过岩石抗张强度后会发生破裂;在形成-扩大-延伸的动态平衡过程中形成一系列平行裂缝,随后热液流体在裂缝中沉淀而形成亮带鞍状白云石。

(3)在斑马构造白云岩中大量发育的裂缝可有效连通孔隙,因此与斑马构造白云岩相关的特殊储层具有一定的油气勘探潜力。

## 参考文献

- [1] ULRICH K, DANIEL K, BEAUDOIN N. Zebra pattern in rocks as a function of grain growth affected by second-phase particles[J]. *Frontiers in physics*, 2015, 3(9): 1-14.
- [2] WALLACE M W, BOTH R A, MORALES-RUANO S, et al. Zebra textures from carbonate-hosted sulfide deposits: sheet cavity networks produced by fracture and solution enlargement [J]. *Economic geology*, 1994, 89(5): 1183-1191.
- [3] DAVIES G R, SMITH L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview: reply [J]. *AAPG bulletin*, 2007, 91(9): 1342-1344.
- [4] ARNE D C, KISSIN S A. The significance of "diagenetic crystallization rhythmities" at the Nanisivik Pb-Zn-Ag deposit, Baffin Island, Canada [J]. *Mineralium deposita*, 1989, 24(3): 230-232.
- [5] SASS-GUSTKIEWICZ M, MOCHNACKA K. Genesis of sphalerite rhythmities from the Upper-Silesian Zinc-Lead deposits: a discussion[M]. New York: Springer Verlag, 1994.
- [6] TOMPKINS L A, RAYNER M J, GROVES D I, et al. Evaporites: in situ sulfur source for rhythmically banded ore in the Cadjetbut mississippi valley-type Zn-Pb deposit, Western Australia [J]. *Economic geology*, 1994, 89(3): 467-492.
- [7] NIELSEN P, SWENNEN R, MUCHEZ P, et al. Origin of Dinantian zebra dolomites south of the Brabant-Wales Massif, Belgium [J]. *Sedimentology*, 1998, 45(4): 727-743.
- [8] DIEHL S F, HOFSTRA A H, KOENIG A E, et al. Hydrothermal zebra dolomite in the Great Basin, Nevada-Attributes and relation to Paleozoic stratigraphy, tectonics, and ore deposits [J]. *Geosphere*, 2010, 6(5): 663-690.
- [9] 郑剑锋,沈安江,莫妮亚,等.塔里木盆地寒武系一下奥陶统白云岩成因及识别特征[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(1): 10-18.
- [10] LIU Shugen, HUANG Wenming, JANSAN L F, et al. Hydrothermal dolomite in the Upper Sinian (Upper Proterozoic) Dengying Formation, East Sichuan Basin, China [J]. *Acta geologica sinica*, 2014, 88(5): 1466-1487.

- [11] 韩晓涛, 鲍征宇, 谢淑云. 四川盆地西南中二叠统白云岩的地球化学特征及其成因[J]. 地球科学, 2016, 41(1): 167-176.
- [12] BONI M, IANNACE A, BECHSTÄDT T, et al. Hydrothermal dolomites in SW Sardinia (Italy) and Cantabria (NW Spain): evidence for Late-to Post-Variscan widespread fluid-flow events[J]. Journal of geochemical exploration, 2000, 69-70 (9): 225-228.
- [13] SWENNEN R, VANDEGINSTE V, ELLAM R. Genesis of zebra dolomites (Cathedral Formation: Canadian Cordillera Fold and Thrust Belt, British Columbia)[J]. Journal of geochemical exploration, 2003, 78(3): 571-577.
- [14] GASPARRINI M, BECHSTÄDT T, BONI M. Massive hydrothermal dolomites in the Southwestern Cantabrian Zone (Spain) and their relation to the Late Variscan evolution[J]. Marine and petroleum geology, 2006, 23(5): 543-568.
- [15] GABELLONE T, IANNACE A, GASPARRINI M. Multiple dolomitization episodes in deep-water limestones of the Triassic Lagonegro Basin (Southern Italy): from early reflux to tectonically driven fluid flow[J]. Journal of sedimentary research, 2014, 84(5): 435-456.
- [16] SWENNEN R, DEWIT J, FIERENS E, et al. Multiple dolomitization events along the Pozalagua Fault (Pozalagua Quarry, Basque-Cantabrian Basin, Northern Spain)[J]. Sedimentology, 2012, 59(4): 1345-1374.
- [17] WALLACE M W, HOOD A V S. Zebra textures in carbonate rocks: fractures produced by the force of crystallization during mineral replacement[J]. Sedimentary geology, 2018, 368 (3): 58-67.
- [18] MORROW D W. Zebra and boxwork fabrics in hydrothermal dolomites of Northern Canada: indicators for dilational fracturing, dissolution or in situ replacement? [J]. Sedimentology, 2014, 61(4): 915-951.
- [19] ARNE D C, CURTIS L W, KISSIN S A. Internal zonation in a carbonate-hosted Zn-Pb-Ag deposit, Nanisivik, Baffin Island, Canada[J]. Economic geology, 1991, 86(4): 699-717.
- [20] KRUG H J, BRANDSTÄDTER H, JACOB K H. Morphological instabilities in pattern formation by precipitation and crystallization processes [J]. Geologische Rundschau, 1996, 85 (1): 19-28.
- [21] 冯轲, 徐胜林, 陈洪德, 等. 四川盆地西南部中二叠统白云岩成因分析: 来自铍同位素、稀土元素证据[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 23-34.
- [22] 魏国齐, 杨威, 朱永刚, 等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 442-448.
- [23] ZHOU Houyun, WANG Qing, ZHAO Jianxin, et al. Rare earth elements and yttrium in a stalagmite from Central China and potential paleoclimatic implications[J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2008, 270 (1 / 2): 128-138.
- [24] ALLAN J R, WIGGINS W D. Dolomite reservoirs: geochemical techniques for evaluating origin and distribution [M]// AAPG Continuing Education Course Note Series 36, 1993: 19-32.
- [25] KORTE C, JASPER T, KOZUR H W, et al.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  of Permian brachiopods: a record of seawater evolution and continental glaciation [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2005, 224(4): 333-351.
- [26] 陈轩, 赵文智, 刘银河, 等. 川西南地区中二叠统热液白云岩特征及勘探思路[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 48-54.
- [27] PALMER M R, EDMOND J M. The strontium isotope budget of the modern ocean [J]. Earth & planetary science letters, 1989, 92(1): 11-26.
- [28] PALMER M R, ELDERFIELD H. Sr isotope composition of sea water over the past 75Ma [J]. Nature, 1985, 314(11): 526-528.
- [29] 黄思静. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、铍同位素研究[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 45-53.
- [30] VANDEGINSTE V, SWENNEN R, GLEESON S A, et al. Zebra dolomitization as a result of focused fluid flow in the Rocky Mountains Fold and Thrust Belt, Canada [J]. Sedimentology, 2005, 52(5): 1067-1095.
- [31] 黄思静, QING Hairuo, 裴昌蓉, 等. 川东三叠系飞仙关组白云岩铍含量、铍同位素组成与白云石化流体[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2123-2132.
- [32] DUNHAM J B, OLSON E R. Shallow subsurface dolomitization of subtidally deposited carbonate sediments in the Hanson Creek Formation (Ordovician-Silurian) of Central Nevada [M]// SEPM Special Publication No. 28, 1980: 139-161.
- [33] BUDD D A. Cenozoic dolomites of carbonate islands: their attributes and origin [J]. Earth-science reviews, 1997, 42(1/2): 1-47.
- [34] 张杰, JONES B, 张建勇. 不同埋藏深度交代白云石晶体结构及其对白云岩储层研究的意义[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(3): 21-28.
- [35] MAZUMDAR A, TANAKA K, TAKAHASHI T, et al. Characteristics of rare earth element abundances in shallow marine continental platform carbonates of Late Neoproterozoic successions from India [J]. Geochemical journal, 2003, 37(2): 277-289.
- [36] FRIMMEL H E. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator [J]. Chemical geology, 2009, 258(3/4): 338-353.
- [37] KLINKHAMMER G P, ELDERFIELD H, EDMOND J M, et al. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1994, 58(23): 5105-5113.
- [38] 孙靖, 黄小平, 金振奎, 等. 碳酸盐矿物阴极发光性的控制因素分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(1): 102-108.
- [39] RAILSBACK L B. Lithologic controls on morphology of pressure-dissolution surfaces (stylolites and dissolution seams) in Paleozoic carbonate rocks from the Midwestern United States [J]. Journal of sedimentary research, 1993, 63(3): 513-522.
- [40] RICKEN W. Diagenetic bedding: a model for limestone-marl alternations [M]. Berlin: Springer Verlag, 1986: 6.
- [41] CHUNG S L, JAHN B. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary [J]. Geology, 1995, 23(10): 889-892.

- [42] 瞿建威, 范蔚茗, 王岳军, 等. 四川宝兴大石包组高钛玄武岩地球化学特征及其岩石成因[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 9-21.
- [43] 刘树文, 杨恺, 李秋根, 等. 新元古代宝兴杂岩的岩石成因及其对扬子西缘构造环境的制约[J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 107-118.
- [44] MALIVA R G, SIEVER R. Diagenetic replacement controlled by force of crystallization[J]. *Geology*, 1988, 16(8): 688-691.
- [45] SCHERER G W. Stress from crystallization of salt[J]. *Cement & concrete research*, 2004, 34(9): 1613-1624.
- [46] MIKEL A, ENEKO I, STEFAN S, et al. An example on the tectonic origin of zebra dolomites: the San Martín beach outcrop (Santoña, North Spain) [J]. *Geogaceta*, 2009, 47(2): 85-88.
- [47] FISHER K, WARPINSKI M. Hydraulic-fracture-height growth: real data[J]. *SPE production & operations*, 2012, 27(1): 8-19.
- [48] 陈轩, 赵文智, 张利萍, 等. 川中地区中二叠统构造热液白云岩的发现及其勘探意义[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 562-569.
- [49] FENG Mingyou, WU Pengcheng, QIANG Zitong, et al. Hydrothermal dolomite reservoir in the Precambrian Dengying Formation of Central Sichuan Basin, Southwestern China[J]. *Marine and petroleum geology*, 2017, 82: 206-219.
- [50] KELKA U, VEVEAKIS M, KOEHN D, et al. Zebra rocks: compaction waves create ore deposits[R/OL]. <https://www.nature.com/scientific-reports/>. scientific reports 7: 14260. DOI: 10.1038/s41598-017-14541-3.
- [51] NADER F H, LÓPEZ-HORGUE M A, SHAH M M, et al. The Ranero hydrothermal dolomites (Albian, Karrantza Valley, Northwest Spain): implications on conceptual dolomite models [J]. *Oil & gas science and technology*, 2012, 67(1): 9-29.
- [52] HIRANI J, BASTESSEN E, BOYCE A, et al. Controls on the formation of stratabound dolostone bodies, Hammam Faraun Fault Block, Gulf of Suez [J]. *Sedimentology*, 2018, 65(6): 1973-2002.

编辑: 董庸

## Genesis of zebra dolomite of the Middle Permian Qixia Formation in the Southwestern Sichuan Basin: taking Wulong outcrop in Baoxing area as an example

ZHAO Jin, FENG Mingyou, SHEN Anjiang, WEN Long, XU Liang, WANG Xingzhi, LIU Xiaohong

**Abstract:** Taking the zebra dolomite of the Middle Permian Qixia Formation in Wulong area of Baoxing in Southwestern Sichuan Basin as the research object, the genesis of the dolomite is analyzed by means of petrology and geochemistry. The zebra dolomite in the area is mainly developed in the upper part of the Qixia Member 1, which occurs in parallel or oblique to the layers. The dark and bright bands of zebra texture are composed of powder-fine dolomite with residual fabric and mesocrystalline-megacrystalline saddle dolomite, the cathodoluminescence of which is dark red and bright red respectively, indicating the element difference of growth space and in the process of metasomatism. The order degree of dolomite of zebra texture is low, and the negative anomaly of  $\delta^{18}\text{O}$  value is obvious. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value of the dark band is in or slightly higher than the seawater range of the same period; the obvious higher  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  value in the bright band indicates the influence of deep fluid. Both the bright band and the dark band have low  $\Sigma\text{REE}$  content and obvious positive Eu anomaly. The comprehensive study shows that the formation of zebra dolomite of Qixia Formation in Southwestern Sichuan belongs to hydrothermal metasomatism-crystallization genesis during burial period, which reflects the dynamic balance process between dolomite crystallization force and rock tensile strength under the continuous supply of hydrothermal fluid. The formation of zebra dolomite undergoes three stages: (1) hydrothermal fluids migrate vertically along the basement fault, and magnesium-rich fluids enter in the high porosity and permeability stratum along the bedding, and continuously dissolve and replace the limestone to form dark band dolomite; (2) when the crystallization force of dolomite is greater than the tensile strength of rock, a series of fractures will be formed; (3) after dissolution, the ions in fluid precipitate to form bright band saddle dolomite in the fracture.

**Key words:** zebra texture; hydrothermal dolomite; metasomatism-crystallization; Qixia Formation; Permian; Southwestern Sichuan Basin

**ZHAO Jin,** First author: Master in progress at Southwest Petroleum University. Add: No. 8 Xindu Avenue, School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China